



Poscosecha

Los nuevos sistemas de clasificación determinan el tipo de defecto e identifican casos de podredumbre

Inspección de frutas y hortalizas mediante videocámara, estado actual de la técnica (I)

En los últimos años hemos asistido a cambios notables en el ámbito de la inspección automatizada de frutas y hortalizas. En este artículo repasamos algunos conceptos y avances en relación con la clasificación de productos hortofrutícolas mediante videocámara. Hace una década la detección de defectos externos no era posible, mientras que sí lo era la clasificación por tamaño y color. Actualmente podemos decir que la clasificación en base a defectos externos funciona bien: los equipos comerciales son capaces de detectar dichos defectos, separando los frutos de la máxima calidad comercial de aquellos de calidad inferior. El problema tradicional de la confusión del cáliz o el pedúnculo del fruto con un defecto se puede considerar superado. Sin embargo, la mayoría de los equipos actualmente instalados en las centrales hortofrutícolas no son capaces de discernir el tipo de defecto.

Moreda, G. P., Muñoz, M. A.,
Barreiro, P. LPF-TAGRALIA.
Departamento Ingeniería
Rural UPM

En la clasificación de productos hortofrutícolas, discernir el tipo de defecto sería interesante, ya que permitiría conocer los más frecuentes, y así poder actuar de cara a la campaña siguiente en relación con el manejo del cultivo o del producto en poscosecha. Recientemente, se han desarrollado sistemas de clasificación mediante videocámara capaces de determinar el tipo de defecto y de identificar podredumbre.

Hace unas décadas, las máquinas empleadas en las centrales hortofrutícolas para clasificar los frutos por su calibre o tamaño eran los calibradores mecánicos, de los cuales existían

numerosas variantes. Éstos se agrupaban en dos grandes grupos: los calibradores mecánicos dimensionales o por diámetro (Fig. 1) y los calibradores mecánicos por peso, existiendo más variedad de los primeros que de los segundos (Brennan et al., 1998; Moreda et al., 2004). En aquella época, si se quería clasificar los frutos según su color, había que hacerlo de forma manual.

Posteriormente, surgieron los calibradores opto-electrónicos y los calibradores electrónicos por peso. Desde su aparición, los calibradores electrónicos han sustituido paulatinamente a sus predecesores mecánicos.



Aunque con el paso de los años han aparecido calibradores opto-electrónicos alternativos, como el sensor de anillo óptico desarrollado por Gall (1997), actualmente el término calibrador opto-electrónico es prácticamente sinónimo de calibrador basado en videocámara –o más rigurosamente: calibrador basado en análisis de imágenes obtenidas con videocámara–, tal y como se muestra en la Fig. 2. A pesar de que investigadores como Carrión et al. (1998) han desarrollado sistemas de clasificación no supervisada, la mayoría de los calibradores comerciales utilizan un esquema de clasificación supervisada. Esto equivale a decir que la mayoría de sistemas de visión artificial¹, o basados en videocámara, requieren un entrenamiento previo al comienzo de la operación de clasificación diaria.

En dicho entrenamiento previo se le muestran al sistema de análisis de imagen computerizado los colores a los que se “enfrentará” cuando comience la jornada de trabajo y tenga que juzgar o clasificar los frutos en base a su color. Por ejemplo, si el objetivo es clasificar mandarinas en base a su coloración superficial, en la fase de entrenamiento previo hay que tomar una o más imágenes de una mandarina “tipo”, que presente, típicamente, colores verde oscuro, verde claro y naranja. Una vez hecho esto, creamos la receta, es decir, establecemos la proporción de cada color que deseamos que tengan los diferentes lotes que vayamos a separar.

Por ejemplo, podemos estar interesados en que una clase o categoría de producto clasificado sea aquel en que los frutos tienen más de un 40% de color verde oscuro (seguramente este grupo tendría que someterse después a desverdizado), etc.



Fig. 1: Calibrador mecánico de banda y rodillos clasificando pomelos en una central cítrica en Florida, EE UU.

Clasificación en calibres comerciales para ordenar y proteger los frutos

En el año 2008, las normas de comercialización² de frutas y hortalizas frescas de la Unión Europea (UE) experimentaron, para un nutrido grupo de productos, un cambio sustancial. Este cambio consistió en la derogación de las normas de comercialización específicas de esos productos y su sustitución por una escueta norma general que no incluía disposiciones relativas al calibre o clasificación por tamaño de los frutos. También es cierto que para los 10 productos más importantes, desde el punto de vista económico, en el conjunto de la UE siguen existiendo nor-

mas de comercialización específicas con disposiciones relativas al calibre³.

La clasificación de los frutos en calibres comerciales, es decir, grupos de tamaño homogéneo, no es únicamente una estrategia comercial para que la fruta resulte más atractiva al consumidor. Desde una óptica puramente ingenieril, la razón más importante que aconseja la clasificación en rangos de calibre es el poder envasar o empaquetar el producto de forma ordenada, en bandejas alveolares como la de la Fig. 3. El envasado en esas bandejas tiene la ventaja fundamental de que el producto se halla bien protegido frente a golpes, vibraciones, compresiones y magulladuras en definitiva. Además, se aprovecha mejor el volumen del contenedor de transporte, ya que se puede conseguir una densidad de encajado⁴ de hasta el 74%, frente a un 60% de media con los frutos a granel en las cajas, sin estar ordenados en bandejas alveolares (Miller, 1992). El anterior valor de 0,74 fue obtenido en el año 1611 por el matemático y astrónomo alemán J. Kepler, conociéndose desde entonces el correspondiente estudio como ‘Conjetura de Kepler’. Se le asignó el grado de conjetura porque aunque Kepler intuía que no podía existir ninguna disposición con una densidad

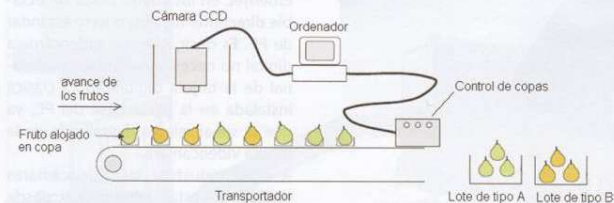


Fig. 2: Esquema básico de un sistema automatizado de clasificación de fruta basado en videocámara. Modificado por los autores a partir de Forbes (2000).

mayor, no pudo demostrarlo fehacientemente. Posteriormente, otro famoso matemático alemán, C.F. Gauss, demostró la conjetura de Kepler para un caso determinado, el de esferas regulares. Pero no fue hasta el año 2005 como consecuencia de la demostración de T. Hales cuando se puede considerar que la conjetura de Kepler ha pasado a ser un teorema⁵.

En el sector de las frutas y hortalizas, el panorama de hace unos años está cambiando, en el sentido de que las empresas y cooperativas fruteras están cada vez más interesadas en poder clasificar la fruta en base a su sabor, no sólo en cuanto a su aspecto visual externo o calidad externa. Está claro por tanto que el futuro irá por ahí. Pero ello no quiere decir que el interés por la determinación de la calidad externa vaya a desaparecer. Aspectos tan importantes como la detección temprana de magulladuras entran dentro de la inspección externa mediante videocámara. En este artículo repasamos algunos conceptos relacionados con la inspección de productos hortofrutícolas con videocámara.

Tipos de videocámaras para inspección de frutas y hortalizas

Los primeros equipos basados en videocámara que se empezaron a utilizar en las líneas de clasificación de frutas y hortalizas estaban constituidos por tubos de rayos catódicos (CRT), sobre todo del tipo Vidicon y Orticon. Unos años más tarde, surgieron los sensores

CCD, que son los que actualmente se utilizan, junto con los CMOS. Estos últimos, han mejorado notablemente sus prestaciones en los últimos años. Una ventaja tradicional del sensor CMOS es que consume menos electricidad que el CCD (Blasco et al., 2009b). Otro aspecto positivo del CMOS es que transfiere las imágenes a una velocidad superior a la del CCD. Y una tercera ventaja del CMOS es que es más barato que el CCD, entre otras cosas porque el CMOS se fabrica en fábricas generalistas de componentes electrónicos, al contrario que el CCD, que se produce en plantas ad hoc. En el otro lado de la balanza, el inconveniente tradicional del chip de imagen CMOS en comparación con el CCD es que las imágenes obtenidas son de peor calidad.

Las primeras videocámaras, tanto las CRT como las CCD, eran analógicas, es decir, la señal de salida de la videocámara era analógica. Sin embargo, en la actualidad, las videocámaras digitales

La mayoría de los calibradores comerciales utilizan un esquema de clasificación supervisada. Es decir, que requieren un entrenamiento previo al comienzo de la operación de clasificación diaria

se imponen en los nuevos equipos comercializados. La diferencia esencial entre una videocámara CCD analógica y una videocámara CCD digital es que la primera requiere de una tarjeta digitalizadora externa, también llamada tarjeta capturadora de video, que convierte en una secuencia de bits las variaciones analógicas de voltaje de la señal de salida de la videocámara. Esa tarjeta digitalizadora de video se acopla a un interfaz o puerto de la placa base del ordenador en el que tengamos instalado el software de análisis de imagen.

Es importante destacar que las cámaras digitales no es que sean estrictamente digitales. Lo que es digital es su señal de salida, ya que la transformación de las variaciones de luminosidad reflejada por el objeto inspeccionado en una señal eléctrica es analógica. De hecho el sensor es del mismo tipo que en la cámara analógica, un CCD⁶. A simple vista, es fácil diferenciar una videocámara industrial analógica de una digital. Para ello nos debemos fijar en el cable de señal⁷, es decir, el cable que comunica la videocámara con el PC. El cable de señal de una videocámara analógica es generalmente o bien coaxial (para señal de video compuesto), o bien VGA (para señal RGB), mientras que el cable de señal de una videocámara digital puede ser de uno de los siguientes tipos: USB, FireWire (IEEE 1394), CameraLink o Gigabit Ethernet, en los cuatro casos conectable directamente a un puerto estándar de PC. Es decir, que una videocámara digital no necesita el hardware adicional de la tarjeta digitalizadora clásica instalada en la placa base del PC, ya que la señal sale ya digitalizada de la propia videocámara.

A nivel industrial las videocámaras digitales se están imponiendo, desde hace varios años, porque alcanzan mayores resoluciones que las analógicas y además el número máximo de

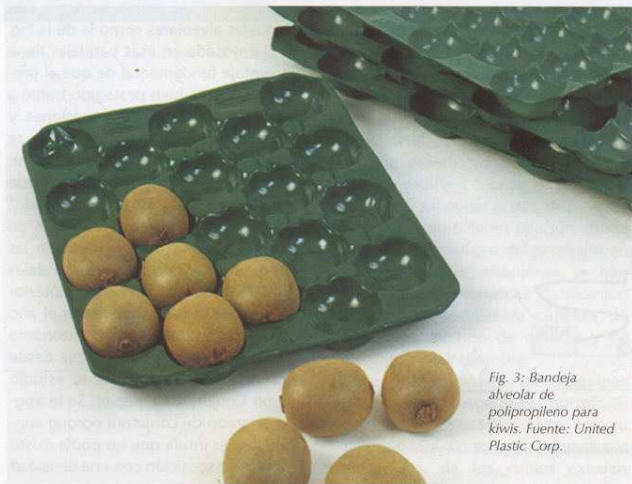


Fig. 3: Bandeja alveolar de polipropileno para kiwis. Fuente: United Plastic Corp.

Las empresas y cooperativas fruteras están cada vez más interesadas en poder clasificar la fruta en base a su sabor, no sólo en cuanto a su aspecto visual externo o calidad externa

imágenes por segundo que ofrecen también es mayor (en las analógicas ese número está limitado a 30 imágenes/s). El inconveniente tradicional de las digitales es que son más caras. Por último, conviene señalar que existe un paso más en el mundo de las videocámaras digitales: las videocámaras inteligentes o, en inglés, 'smart cameras'. Este tipo de videocámara es el más caro de todos, ya que no necesita conectarse a un PC para transferir las imágenes, sino que tiene un pequeño ordenador integrado en el propio cuerpo de la videocámara. Se trata de videocámaras muy útiles en aplicaciones o

emplazamientos donde resulta engorroso o impracticable tener un ordenador cerca, por ejemplo en videovigilancia del tránsito rodado en carreteras⁸. Sin embargo, en una instalación industrial con inspección por videocámara no hay por qué recurrir a una 'smart camera', ya que situar un ordenador en las proximidades de la videocámara no es especialmente complicado. Aparte de la clasificación de las videocámaras en analógicas o digitales, otro aspecto que queremos repasar aquí es la diferencia entre una cámara de barrido entrelazado y una cámara de barrido progresivo o secuencial. En el futuro



Fig. 4: Mano en movimiento capturada con una videocámara de barrido entrelazado. Fuente: Taylor (1998).

ro puede que ya ni siquiera se mencionen las primeras al hablar de visión artificial, al menos en relación con la inspección de productos en movimiento, ya que en los últimos años han sido claramente desplazadas por las de barrido progresivo. En la figura 4 puede-



Líneas completas de lavado, secado y abrillantado de frutas y verduras.



Túneles para el lavado, secado y desinfectado de cajas y contenedores "palots"



Zona Industrial Pont-Xetmar C/ C, 16-18 Cornellà de Terri - 17844 GIRONA. tel. +34 972 594 077 fax. +34 972 594 516

dinox@dinox.es
www.dinox.es

mos apreciar por qué las cámaras de barrido entrelazado han quedado obsoletas hoy en día para la inspección de productos en movimiento. Estas videocámaras exploran, escanean o "barren" primero la mitad de las filas de la imagen (campo par) y después la otra mitad (campo impar), como consecuencia. Si el objeto se ha desplazado, al final la imagen aparecerá distorsionada. Tradicionalmente, en la tecnología televisiva se ha empleado este sistema de imagen entrelazada⁹, ya que para el objetivo previsto, se aprovecha el efecto de la persistencia de las imágenes en la retina del telespectador. Sin embargo, en inspección automática de productos sí que tiene importancia la distorsión de la imagen, ya que afecta a las mediciones posteriores realizadas con el análisis de imagen.

Durante la inspección se presentan problemas como el de los llamados "frutos dobles". Si no se remedia, el programa de análisis de imagen podría interpretar que se trata de un único fruto bastante grande

Tanto en el caso de cámaras CCD como de cámaras CMOS, el sensor de imagen, es decir, el "chip" CCD o CMOS, puede estar constituido por varias filas de píxeles (sensor matricial o area-scan) o por una sola. En este último caso, tenemos las cámaras de líneas (en inglés, line-scan camera). Las cámaras de líneas son muy parecidas a un escáner de documentos, con la diferencia de que en el caso de la inspección industrial el sensor está inmóvil mientras el producto se mueve bajo



Fig. 5: Pruebas realizadas en el año 2001 con un sistema de clasificación por videocámara propiedad de Maxfrut, S.L. Las videocámaras centinales, ubicadas en la parte superior del túnel metálico, son de color negro, con una pegatina amarilla en el objetivo. Lo que se vislumbra en el hastial del túnel es un extractor de calor. Hay dos videocámaras, alineadas según el eje longitudinal de la máquina, una para imagen en color y otra para imagen NIR.

él. En general, las cámaras de líneas ofrecen mayor resolución que las matriciales. Las cámaras de líneas se utilizan sobre todo en inspección de productos de superficie plana, como telas, materiales cerámicos de construcción, etc. Lo habitual, en inspección de frutas y hortalizas es utilizar sensores matriciales (area-scan). Si se utilizara una cámara de líneas, como los frutos han de girar a su paso por debajo de la cámara para poder determinar correctamente su color y presencia o ausencia de defectos externos, y además dichos frutos tienen tamaños variables, el sistema podría funcionar incorrectamente (Yang, 1992). No obstante, históricamente algunos investigadores han utilizado cámaras de líneas para inspeccionar productos hortofrutícolas, pero lo han hecho utilizando un esquema de instalación diferente al habitual, por ejemplo en el caso de Delwiche et al. (1993) colocando tres cámaras equi espaciadas angularmente 120° para que vean el fruto según este va volando por el aire (es decir, no girando sobre unos rodillos como en el caso habitual).

Si queremos obtener una imagen en color y otra de infrarrojo cercano o NIR (en el apartado 5 se justifica el interés de esto), hay varias posibilidades. La primera consiste en utilizar dos cáma-

ras independientes (Fig.5), cada una con su CCD, y hacer que los objetivos apunten a un mismo punto. Este diseño tiene el inconveniente de que los puntos de vista o ángulos son diferentes para una cámara y otra (por lo tanto para una imagen y otra). Actualmente, hay otros dos diseños posibles, ambos consistentes en una sola carcasa con un solo objetivo: tener 2 CCDs, uno en color y otro NIR, y la otra es tener 4 CCDs, tres para cada uno de los colores primarios (rojo, verde y azul) y el cuarto NIR. La solución que utiliza 2 CCDs (figura 6) es más económica que la de 4 CCDs. A cambio, el inconveniente de la solución que emplea 2 CCDs es que la calidad de la imagen en color es inferior a la del caso de 4 CCDs.

Durante la inspección de frutos mediante videocámaras se presentan una serie de problemas de tipo práctico, para los que se han hallado diferentes soluciones con el paso de los años. Uno de ellos es el de los llamados "frutos dobles", o, abusando aún más del lenguaje, "frutos doblados" –no obstante ese abuso, por comodidad vamos a utilizar esta nomenclatura-. Esto hace referencia a la situación en que dos frutos viajan alojados en la misma copa. Si no se hace nada para remediarlo, el programa de análisis de imagen podría interpretar que se trata

de un único fruto bastante grande. Para evitar este error de clasificación, se puede recurrir a sencillos artilugios como el mostrado en la Fig. 8, en el que una varilla de nylon expulsa del calibrador a los frutos que sobran (es decir, los "dobladitos"). En concreto, en la figura 9, en la tercera calle, si se empieza a contar por abajo, se aprecia el funciona-

miento del sistema de eliminación de frutos dobles. Igualmente, en la primera calle, empezando por arriba, se aprecian dos frutos que cuando hayan avanzado un poco "pondrán a prueba" al sistema eyector de varilla. Otra posibilidad es tratar de resolver este asunto mediante análisis de imagen, como hicieron Aleixos et al. (2002), asignan-

do los cambios bruscos en la dirección de la tangente al contorno a puntos de contacto entre frutos dobles. ■

En el próximo número de Horticultura (HC299) publicaremos la segunda parte de este artículo.

Notas al pie

- ¹ En inglés, machine vision o computer vision.
- ² En terminología consuetudinaria, normas de calidad.
- ³ Para un análisis detallado de las motivaciones y posible evolución de la normativa comunitaria en este asunto recomendamos el artículo de Milzow (2009).
- ⁴ Definida como volumen del contenido/volumen del continente.
- ⁵ Todo el asunto surgió en 1587, cuando con motivo de uno de sus viajes al Nuevo Mundo el explorador inglés W. Raleigh le preguntó a su amigo y compañero de viaje, el matemático y astrónomo T. Harriot sobre cuál sería la disposición de balas de cañón que ocuparía menos espacio en la cubierta del barco. Parece ser que Harriot salió airoso del dilema, y unos años más tarde se carteoó con su coetáneo Kepler acerca del asunto. Parece ser también que a Kepler le había llamado la atención la disposición piramidal de la fruta en los puestos del mercado.
- ⁶ De hecho, como regla general, la mayoría de sensores existentes para la medida de las diversas magnitudes físicas son analógicos; digitales hay muy pocos tipos.
- ⁷ Por supuesto, una opción expedita es leer directamente la información rotulada en la placa o etiqueta/pegatina de características en la carcasa de la videocámara: puede que con eso podamos averiguar si es analógica o digital.
- ⁸ No pretendemos ser pedantes utilizando tránsito rodado en lugar de tráfico. Lo hacemos porque siguiendo el criterio del profesor R. Dal-Ré Tenreiro, de la E.T.S.I. Agrónomos de Madrid, consideramos que es más correcto tránsito, ya que el verbo correspondiente es transitar, no traficar, que tiene otro significado.
- ⁹ En los comienzos de la televisión, se decidió adoptar la tecnología de barrido entrelazado para minimizar el ancho de banda ocupado en el espectro de radiofrecuencia. Pero cuando se trata de un sistema de transmisión de señal de vídeo por cable, esto no es un factor limitante.

proyectos llave en mano

Invernaderos **aprr** y
equipamiento tecnológico

Calefacción agua caliente

Embalses

Tratamientos Fitosanitarios
HUMIFITO

Tratamientos de Agua
OSMAQUA

Riego por goteo

Fertirrigación
XILEMA

Control Climático **climatec**

Novedades Agrícolas

902 400 313

www.novedades-agricolas.com

PREMIO CODESPA
PYME SOLIDARIA